



Сохранение и развитие уникального научно-технического потенциала в области отечественной фотоники, его практическое использование, а также информационное обеспечение реализации государственных проектов и программ, процессов создания оптических технологий и устройств, защиты интеллектуальной собственности являются крайне актуальными задачами. Их решению будет способствовать новая серия книг «Мир фотоники».

Директор Департамента оборонно-промышленного комплекса Минпромторга России К.А. Марабрин



ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ КНИГ «МИР ФОТОНИКИ»

Тарабрин Константин Анатольевич – директор Департамента оборонно-промышленного комплекса Минпромторга России (**председатель**), г. Москва

Капранов Дмитрий Валерьевич – директор Департамента промышленности обычных вооружений, боеприпасов и спецхимии Минпромторга России (**заместитель председателя**), г. Москва

Ковш Иван Борисович – президент Лазерной ассоциации, д.ф-м.н., профессор (**заместитель председателя**), г. Москва

Андреев Алексей Гурьевич – генеральный директор АО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», г. Пермь

Архипова Людмила Николаевна – главный оптик АО «ГОИ им. С.И. Вавилова», г. Санкт-Петербург

Бабин Сергей Алексеевич – директор ИАиЭ СО РАН, чл.-корр. РАН, г. Новосибирск

Боев Сергей Федотович – генеральный директор ПАО МАК «Вымпел», д.т.н., д.э.н., профессор, г. Москва

Васильев Владимир Николаевич – ректор ИТМО, чл.-корр. РАН, г. Санкт-Петербург

Гапонцев Валентин Павлович – генеральный директор корпорации IPG Photonics, США

Гаранин Сергей Григорьевич – генеральный конструктор по лазерным системам – заместитель директора РФЯЦ-ВНИИЭФ по лазерно-физическому направлению, директор ИЛФИ, академик РАН, г. Саров

Евтихий Николай Николаевич – зам. ген. директора по НИОКР НТО «ИРЭ-Полус», д.ф-м.н., профессор, г. Фрязино

Забродский Андрей Георгиевич – главный научный сотрудник ФТИ РАН, академик РАН, г. Санкт-Петербург

Иванов Виктор Владимирович – директор Физтех-школы электроники, фотоники и молекулярной физики МФТИ, чл.-корр. РАН, г. Москва

Колачевский Николай Николаевич – директор ФИАН, чл.-корр. РАН, г. Москва

Крохин Олег Николаевич – академик РАН, г. Москва

Крутиков Владимир Николаевич – главный научный сотрудник ВНИИОФИ, д.т.н., профессор, г. Москва

Кузнецов Евгений Викторович – генеральный директор АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», д.т.н., профессор, г. Москва

Кульчин Юрий Николаевич – научный руководитель ИАиПУ ДВО РАН, академик РАН, г. Владивосток

Левшаков Валерий Михайлович – директор НТФ «Судотехнология», к.т.н., г. Санкт-Петербург

Макаров Владимир Анатольевич – директор Лазерного центра МГУ им. М.В. Ломоносова, д.ф-м.н., профессор, г. Москва

Микаелян Геворк Татевосович – научный руководитель ООО «НПП «Инжект», д.ф-м.н., профессор, г. Саратов

Панченко Владислав Яковлевич – председатель Совета РФФИ, академик РАН, г. Москва

Патрикеев Алексей Павлович – генеральный директор АО «Швабе», д.т.н., г. Москва

Пустовойт Владислав Иванович – научный руководитель ФГБУН НТЦ УП РАН, академик РАН, г. Москва

Савиных Виктор Петрович – президент МИИГАиК, чл.-корр. РАН, г. Москва

Солдатов Анатолий Николаевич – д.ф-м.н., профессор, г. Томск

Шаргородский Виктор Данилович – генеральный конструктор НПК «СПП», д.т.н., профессор, г. Москва

Щербаков Иван Александрович – научный руководитель ИОФ РАН, академик РАН, г. Москва



М И Р Ф О Т О Н И К И

Л.А. Скворцов

Основы фототермической
радиометрии и лазерной
термографии

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2019

УДК 543.52 + 621.373

ББК 22.34

С42

Рецензенты:

Проскурнин М.А. – д.х.н., профессор МГУ им. М.В. Ломоносова

Свиридов А.П. – д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ФНИЦ

«Кристаллография и фотоника» РАН

С42 Скворцов Л.А.

Основы фототермической радиометрии и лазерной термографии

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2019. – 220 с. ISBN 978-5-94836-493-3

В книге содержится последовательное изложение принципов фототермической радиометрии/спектроскопии и лазерной термографии – перспективного направления в спектроскопии и тепловидении. В основе нового метода исследований лежит радиометрическая регистрация поглощенной энергии в исследуемых средах при воздействии на них лазерного излучения. Подробно излагается современное состояние и перспективы развития нового направления, его преимущества и границы применимости по сравнению с другими фототермическими методами. Рассмотрены теоретические основы метода модуляционной и импульсной фототермической радиометрии, ее различные модификации, включая резонансную и *pump-probe* фототермическую радиометрию и термографию. Приводятся многочисленные примеры практической реализации фототермической радиометрии и лазерной термографии в различных областях науки и техники, в частности для дистанционного измерения температуры объектов, исследования слабопоглощающих сред, дистанционного обнаружения и идентификации следовых количеств вещества, неразрушающего контроля материалов и покрытий, измерения их теплофизических параметров. Обсуждаются вопросы, связанные с особенностями применения метода для контроля качества полупроводниковых материалов, например, в части обнаружения подповерхностных дефектов и примесей, измерения их концентрации и энергии активации. Особое внимание в книге уделяется возможностям метода применительно к таким практически значимым областям, как медицина и биология.

Книга рассчитана на широкий круг специалистов, работающих в области спектроскопии, лазерной физики, химии, биологии и также может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.

Ключевые слова: фототермические методы, фототермическая радиометрия, резонансная фототермическая радиометрия, *pump-probe* фототермическая спектроскопия, лазерная термография, тепловые волны, плазменные волны в полупроводниках, дистанционные измерения, неразрушающий контроль, фототермическая радиометрия и имиджинг биологических тканей.

Автор выражает благодарность рецензентам за интерес, проявленный к рукописи и сделанные ценные замечания.

УДК 543.52 + 621.373

ББК 22.34

© 2019, Скворцов Л.А.

© 2019, АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-493-3

Содержание

Предисловие	10
Глава 1. Краткий обзор методов исследования, основанных на фототермическом эффекте	14
1.1. Фотоакустический метод.....	14
1.2. Дефлекционный метод (мираж-эффект).....	15
1.3. Метод термолинзы.....	16
1.4. Поверхностная термическая линза.....	19
1.5. Метод фототермической радиометрии.....	20
1.6. Метод фототермического отражения.....	21
1.7. Интерференционный метод.....	22
Глава 2. Основы классической радиометрии	24
2.1. Радиометрические величины и их количественные соотношения.....	24
2.2. Законы теплового излучения.....	27
2.2.1. Излучательная и поглощательная способность тел.....	27
2.2.2. Закон Кирхгофа.....	30
2.2.3. Закон Планка.....	32
2.2.4. Закон смещения Вина и закон Стефана – Больцмана.....	33
Глава 3. Общие сведения о фотоприемниках и радиометрических свойствах инфракрасной системы	36
3.1. Основные характеристики приемников излучения.....	36
3.2. Параметры, характеризующие радиометрические свойства инфракрасной системы.....	38
Глава 4. Теоретическое обоснование метода фототермической радиометрии и лазерной термографии	40
4.1. Диффузионные волны.....	40
4.1.1. Введение.....	40
4.1.2. Математика диффузионных волн.....	41
4.1.3. Физика диффузионных волн.....	42
4.2. Концепция тепловых волн.....	44
4.2.1. Импульсные и периодически модулированные тепловые волны.....	45
4.2.2. Свойства тепловых волн.....	46

4.3. Плазменные волны носителей заряда в полупроводниках.....	47
4.3.1. Происхождение плазменных волн.....	47
4.3.2. Свойства плазменных волн и их детектирование.....	48
Глава 5. Измерение теплофизических параметров тел с помощью методов фототермической радиометрии и лазерной термографии.....	50
5.1. Введение.....	50
5.2. Эффект фототермического «насыщения».....	52
5.3. Метод лазерной вспышки.....	53
5.4. Метод термоволновой интерферометрии (TWI-метод).....	56
5.5. Термографические методы.....	58
5.5.1. Термографический метод I (регистрация пространственного распределения температуры при нагреве поверхности ограниченным пучком).....	58
5.5.2. Термографический метод II (регистрация температуры вдоль стержня при возбуждении в нем поперечных тепловых волн).....	61
5.5.3. Термографический метод III (конфигурация «отражения» при импульсном нагреве, односторонний метод вспышки).....	63
5.6. Выводы.....	65
Глава 6. Дистанционное измерение температуры тел при лазерной активации поверхности.....	67
6.1. Физические основы измерения температуры поверхности тел с помощью лазерной фототермической радиометрии.....	67
6.1.1. Основные проблемы классической пирометрии.....	67
6.1.2. Внешняя модуляция собственного теплового потока как способ устранения влияния фоновых сигналов.....	69
6.2. Особенности измерения температуры при воздействии на объект модулированного по амплитуде лазерного излучения.....	71
6.2.1. Физические принципы, лежащие в основе метода.....	71
6.2.2. Область высоких температур ($T > 750$ К).....	79
6.2.3. Область низких температур (260—340 К).....	81
6.3. Особенности измерения температуры при импульсном режиме облучения.....	82
6.3.1. Физические принципы, лежащие в основе метода.....	82
6.3.2. Временная зависимость фототермического сигнала.....	84

6.3.3. Влияние экспериментальных параметров на результат измерений.....	89
6.3.4. Результаты измерений и их обсуждение.....	91
6.4. Измерение температуры поверхности путем анализа кривой затухания фототермического сигнала.....	95
Глава 7. Неразрушающий контроль.....	98
7.1. Применение лазерной термографии для обнаружения поверхностных трещин.....	98
7.1.1. Введение.....	98
7.1.2. Особенности активной термографии для неразрушающего контроля материалов при использовании лазерного (точечного) источника нагрева.....	99
7.1.3. Практическая реализация метода лазерной термографии.....	101
7.1.4. Моделирование теплового поля при наличии вертикальной трещины.....	104
7.1.5. Визуализация трещины при наличии теплового фона от лазерного воздействия.....	108
7.2. Неразрушающий контроль силы адгезии гальванических покрытий и обнаружение дефектов отслоения.....	111
7.2.1. Введение.....	111
7.2.2. Основные представления о распространении тепловых волн на границе раздела сред.....	113
7.2.3. Измерение толщины упрочняющего слоя на поверхности стали.....	114
7.2.4. Контроль силы адгезии гальванически осажденных слоев.....	116
7.2.5. Обнаружение дефектов отслоения гальванических покрытий.....	117
7.3. Особенности применения термографической системы с лазерным сканирующим устройством.....	119
7.3.1. Численное 2D-моделирование тепловых полей, индуцируемых лазерным воздействием.....	119
7.3.2. Пространственное (поперечное) разрешение при лазерном сканировании.....	121
7.3.3. Выводы.....	121
Глава 8. Измерение поглощения в оптических материалах и покрытиях.....	123
8.1. Введение.....	123

8.2. Теоретическое рассмотрение метода фототермической радиометрии применительно к измерению малых поглощений.....	124
8.3. Измерение потерь на поглощение в оптических покрытиях.....	129
8.4. Измерение объемного коэффициента поглощения в прозрачных материалах.....	130
8.5. Оценка толщины излучающего тепловой поток слоя вещества и верхней граничной частоты повторения лазерных импульсов. Границы применения метода.....	131
8.6. Внутррезонаторная лазерная фототермическая радиометрия.....	134
8.6.1. Измерение поглощения в образцах с просветляющими покрытиями.....	134
8.6.2. Измерение поглощения в образцах без покрытий.....	137
8.6.3. Измерение поглощения в зеркальных покрытиях.....	138
8.7. Измерение поверхностного поглощения в оптических материалах.....	140
8.7.1. Введение.....	140
8.7.2. Метод измерений.....	140
8.7.3. Пример практической реализации метода.....	141
8.8. Неразрушающий контроль лазерной прочности оптических покрытий.....	143
Глава 9. Двухлучевая (pump-probe) лазерная фототермическая радиометрия.....	147
9.1. Введение.....	147
9.2. Оценка чувствительности метода.....	148
9.3. Пример реализации метода pump-probe фототермической радиометрии.....	149
9.4. Выводы.....	151
Глава 10. Резонансная инфракрасная фототермическая спектроскопия.....	153
10.1. Введение.....	153
10.2. Лазерные источники излучения в среднем и дальнем ИК-диапазоне спектра.....	154
10.3. Примеры практической реализации метода активного формирования гипер/мультиспектральных изображений в спектре теплового излучения.....	157
10.3.1. Дистанционное обнаружение следовых количеств вещества с помощью квантово-каскадных лазеров.....	157
10.3.2. Применение CO ₂ -лазера для практической реализации метода.....	160

10.4. Оценка чувствительности метода.....	163
10.4.1. Расчет температуры нагрева.....	163
10.4.2. Расчет мощности теплового излучения.....	164
10.4.3. Расчет минимальной концентрации вещества и дальности обнаружения.....	165
10.6. Выводы.....	167
Глава 11. Применение лазерной фототермической радиометрии для исследования полупроводниковых материалов.....	169
11.1. Введение.....	169
11.2. Особенности применения метода для полупроводниковых материалов.....	170
11.3. Практическая реализация метода на примере МОП-структур.....	171
11.4. Измерение времени жизни носителей заряда и контроль наличия примесей.....	173
11.5. Метрология ионной имплантации.....	174
11.6. Выводы.....	177
Глава 12. Применение лазерной фототермической радиометрии для медицинской диагностики и лечения заболеваний.....	178
12.1. Введение.....	178
12.2. Импульсная лазерная фототермическая радиометрия как метод диагностики и лечения заболеваний.....	179
12.3. Примеры практической реализации метода при лечении и диагностике заболеваний.....	182
12.3.1. Диагностика родимых пятен «цвета португальской розы» (винное пятно).....	182
12.3.2. Определение степени гидратации кожи.....	183
12.3.3. Диагностика структурных преобразований ткани под действием лазерного излучения в процессе хирургического вмешательства.....	185
12.3.4. Лазерная инженерия хрящей.....	189
12.3.5. Фототермическая томография.....	190
12.4. Выводы.....	191
Заключение.....	193
Литература.....	195

Предисловие

Каждый объект с температурой, отличной от абсолютного нуля, испускает излучение, которое называется тепловым. Тепловое излучение при температуре окружающей среды состоит из собственного излучения, обусловленного переходами между колебательными и вращательными энергетическими уровнями молекул, а также из отраженного и прошедшего через объект излучения от других источников.

В монографии рассматривается тепловое излучение в диапазоне длин волн 3—14 мкм. Это объясняется главным образом двумя причинами. Во-первых, большая часть энергии излучения, испускаемого объектами при температуре окружающей среды, приходится именно на этот диапазон. Во-вторых, в этом диапазоне находятся окна прозрачности атмосферы (рис. 1), которые позволяют обнаруживать оптические сигналы на сравнительно больших расстояниях с помощью фотоприемных устройств инфракрасного излучения.

Инфракрасное излучение, испускаемое объектами, измеряется с помощью приборов, называемых радиометрами. Классические (пассивные) радиометры состоят из оптической системы и приемника излучения. При этом они используются для измерения характеристик излучения точечных источников или источников весьма малых угловых размеров. Для измерения излучения объектов больших угловых размеров, в частности для визуализации и исследования распределения на них поля температур, используют термографы, в которых имеется уже не один фотоприемный элемент, а их массив, представляющий собой либо линейку, либо двумерную матрицу. Термографию поверхности исследуемого объекта можно осуществлять и с помощью одноэлементного радиометра,

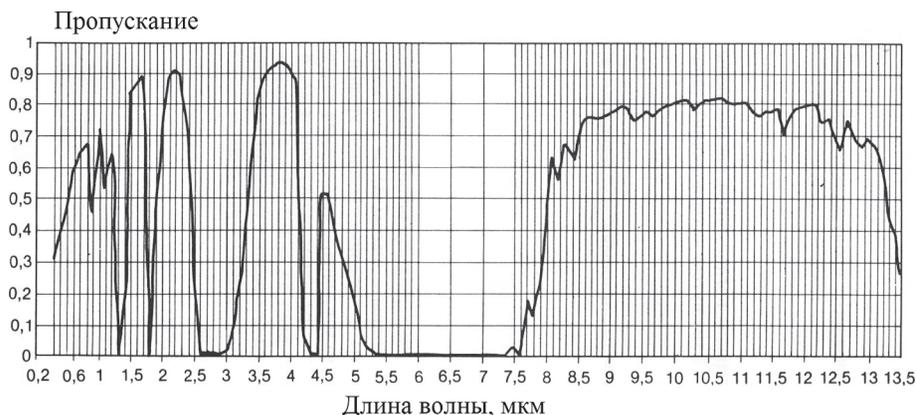


Рис. 1. Спектральное пропускание атмосферы, рассчитанное для длины оптической трассы $D = 1,852$ км (1 морская миля) при метеорологической дальности видимости $D_v = 20$ км (ясная погода) [1]

снабженного сканирующей системой, обеспечивающей необходимое поле обзора [1, 2]. Общей для радиометров и термографов является радиометрическая цепочка, которой называют совокупность явлений, происходящих с момента испускания излучения источником до его поглощения приемником. Одним из существенных недостатков пассивной радиометрии является невозможность ее применения при наличии сильных тепловых помех.

В последние десятилетия получила развитие так называемая активная радиометрия, когда исследуемый объект подвергается воздействию внешнего фактора, изменяющего его состояние. В частности, это может быть воздействие лазерного излучения. В этом случае принято говорить о лазерной фототермической радиометрии или просто фототермической радиометрии (ЛФТР, ФТР). Учитывая то общее, что объединяет радиометрию и термографию, можно говорить и об активной (лазерной) термографии, в основе которой лежат те же физические принципы.

Основной особенностью метода ЛФТР, как уже отмечалось, является его активный характер, так как в процессе измерений исследуемый объект подвергается дополнительному воздействию лазерного излучения. Кроме того, он является неразрушающим и в большинстве случаев бесконтактным методом исследования. Метод ЛФТР может быть реализован двумя основными способами. В первом способе непрерывное лазерное излучение, воздействующее на образец, периодически модулировано по амплитуде (так называемая модуляционная фототермическая радиометрия, *PTR*). Второй способ — это импульсная фототермическая радиометрия (*Pulsed Photothermal Radiometry, PPTR*), использующая одиночные или периодически повторяющиеся импульсы лазерного излучения. Как в первом, так и во втором случаях имеет место модуляция температуры поверхности и регистрируемого теплового сигнала вследствие поглощения объектом лазерного излучения и выделения при этом тепла. Анализируя временную зависимость величины регистрируемого сигнала и его фазы, можно получить информацию о различных физических свойствах объекта.

Метод ЛФТР представляет собой модуляционную технику измерений, когда возмущения какого-либо параметра исследуемого материала достигаются путем воздействия модулированного (импульсного) лазерного излучения. Это делает возможным устранение фонового бесструктурного компонента регистрируемого фототермического сигнала и получение дифференциальных спектров. Последнее связано с тем, что регистрируемый сигнал напрямую связан не с самим параметром, подлежащим измерению, а с его изменением, т. е. с производной этого параметра по температуре. Поэтому фототермические спектры несут в себе особенности, анализ которых позволяет судить о свойствах вещества, не всегда проявляемых при исследовании с помощью методов традиционной спектроскопии.

Сказанное выше позволяет отметить ряд преимуществ, выгодно отличающих метод ЛФТР от традиционной пассивной радиометрии:

1. Пространственное разрешение активной радиометрии в общем случае определяется размером нагреваемой области на объекте. Если в качестве источника нагрева использовать лазер, размер нагреваемой области соответствует диаметру лазерного пятна, который может быть сделан порядка длины волны лазерного излучения. Следовательно, пространственное разрешение метода при определенных условиях может быть очень высоким и находится в субмикронной области.
2. В случае слабо излучающих сред отношение «сигнал/шум» может быть увеличено за счет увеличения подводимого к объекту тепла. Другими словами, возможно повышение чувствительности с повышением мощности лазерного излучения (вплоть до режима насыщения поглощения).
3. Активный метод является устойчивым к тепловому и электронному дрейфу, т.к. измеряется зависящая от времени часть сигнала (нулевой способ измерения: при отсутствии поглощения выходной сигнал равен нулю).
4. По этой же причине на результат измерений не влияют постоянные или слабо изменяющиеся во времени отраженные радиационные потоки (тепловой фон). Следовательно, активные методы применимы для исследования и обнаружения объектов, находящихся в окружении сильно нагретых тел и тел с высокой излучательной способностью.
5. Временное разрешение метода может быть увеличено за счет сокращения длительности лазерного импульса. Это позволяет измерять температуру быстро перемещающихся в пространстве объектов, а также исследовать быстротекущие во времени процессы, что чрезвычайно важно для динамической радиометрии (термографии).
6. Предельная чувствительность метода ЛФТР принципиально ограничена тепловыми флуктуациями в исследуемой среде.

Метод ЛФТР занимает достойное место в ряду так называемых фототермических технологий, в основе которых лежит фототермический эффект. Отмеченные особенности метода ЛФТР открыли новые возможности для:

- обнаружения удаленных объектов на фоне сильных тепловых помех;
- дистанционного измерения температуры быстро перемещающихся объектов;
- динамического исследования температурных полей малоразмерных объектов;
- дистанционного измерения теплофизических параметров материалов;
- измерения сверхмалых величин поверхностного (объемного) поглощения и его спектральной зависимости;



- исследования фотоиндуцированных процессов на поверхности полупроводников;
- изучения на субмикронном уровне дефектов структуры в поверхностных слоях материалов;
- исследования процесса взаимодействия лазерного излучения с веществом;
- проведения круглосуточного всепогодного мониторинга окружающей среды;
- дистанционного обнаружения и идентификации сложных молекул на поверхности объектов, в том числе остатков взрывчатых веществ;
- медицинской диагностики, в том числе оптической томографии;
- дистанционного неразрушающего контроля и т. д.

Несмотря на большое количество публикаций в виде оригинальных статей и обзоров, до сих пор отсутствует систематизированный анализ лазерной фототермической радиометрии и термографии как метода исследований, обобщенное рассмотрение возможных областей применения метода, а также анализ перспектив его применения в науке, промышленности, биологии и медицине.

Настоящая монография представляет собой попытку в краткой и доступной форме устранить этот пробел.

ГЛАВА I

КРАТКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОСНОВАННЫХ НА ФОТОТЕРМИЧЕСКОМ ЭФФЕКТЕ

I.1. Фотоакустический метод

Суть фотоакустического метода заключается в следующем [3, 4]. Исследуемый образец, размещенный в специальной ячейке, облучают модулированным лазерным излучением, которое полностью или частично поглощается в нем, вызывая нагрев образца. Выделяющееся в образце тепло передается находящейся в акустической ячейке газовой среде, что приводит к периодическому изменению давления. Возбуждаемые таким образом акустические волны регистрируются высокочувствительным микрофоном, встроенным в ячейку (рис. 1.1).

Возможно также контактное измерение фотоакустического сигнала при исследовании, например, твердых тел с помощью пьезоэлектрического датчика, непосредственно размещенного на поверхности образца. В последнее время уделяется внимание развитию открытых фотоакустических систем с чувствительным элементом в виде настраиваемого кварцевого камертона (*quartz tuning fork*),

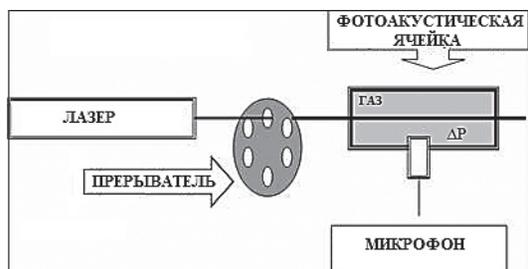


Рис. 1.1. Схематическое представление фотоакустического метода [4]

которые рассматриваются как перспективные устройства для дистанционного детектирования химических соединений на поверхностях тел [5].

Фотоакустическая спектроскопия, благодаря своей высокой чувствительности, позволяет существенно продвинуться в область анализа слабопоглощающих сред [6, 7]. Для решения проблем, связанных с охраной окружающей среды, созданы высокочувствительные фотоакустические многокомпонентные газоанализаторы [8—11]. Фотоакустический эффект положен в основу измерения термодинамических параметров газовых, жидких и конденсированных сред [12—15]. Фотоакустические микроскопия и дефектоскопия широко используются в современном материаловедении, биологии и медицине [16—19]. В последнее время заметное внимание уделяется исследованию возможности применения фотоакустической спектроскопии для дистанционного детектирования следов химических соединений [20—22] и т. д. Фотоакустическому методу исследования вещества в различных агрегатных состояниях посвящено значительное количество обзоров и монографий [23—25].

1.2. Дефлекционный метод (мираж-эффект)

Согласно этому методу модулированное возбуждающее излучение нагревает поверхность исследуемого образца. В результате теплопередачи это приводит к периодическому нагреву приповерхностного слоя среды, соприкасающегося с образцом. Возникновение градиента температуры в среде около поверхности и связанного с этим изменения ее показателя преломления обнаруживается по отклонению пробного луча, распространяющегося параллельно поверхности образца (мираж-эффект) и регистрируемого с помощью позиционно-чувствительного фотоприемника (рис. 1.2).

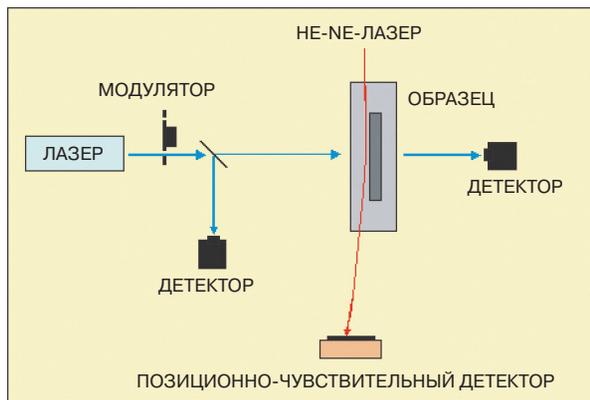


Рис. 1.2. Схематическое представление дефлекционного метода [26]

Для повышения чувствительности метода образец, как правило, размещают в кювете с прозрачной жидкостью, коэффициент преломления которой сильно зависит от температуры. С помощью такой схемы возможно измерение приращения температуры на поверхности образца на уровне 10^{-4} К, что соответствует углу отклонения пробного луча около 10^{-9} радиан [26]. Такая чувствительность позволяет измерять коэффициент поглощения в твердых телах на уровне $\sim 10^{-7}$ см $^{-1}$ [27]. Эта техника широко применяется для измерений оптических (коэффициент поглощения [28, 29]), термических (теплопроводность [30–32], температура [33]) и электрических свойств материалов [34]. Существует ряд обзоров и монографий, в которых можно найти обширную информацию об этом способе измерений [24, 35].

1.3. Метод термолинзы

В упрощенном виде сущность метода заключается в следующем. При воздействии на поглощающую среду лазерного пучка с гауссовым распределением интенсивности в поперечном сечении в ней устанавливается градиент температуры, обусловленный неоднородным нагревом. Изменение температуры, в свою очередь, вызывает локальные изменения показателя преломления среды в соответствии с распределением интенсивности лазерного пучка. Из-за появления градиента показателя преломления в среде возникает оптический элемент, действие которого аналогично действию рассеивающей/собирающей линзы, получивший название термолинзы. Так как показатель преломления большинства веществ в области прозрачности уменьшается с ростом температуры, то термолинза, как правило, является рассеивающей, то есть поперечный размер лазерного пучка увеличивается по мере нагрева среды.

В более общем случае вариации показателя преломления среды могут быть обусловлены как изменениями температуры T , так и плотности ρ среды:

$$\Delta n = \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right)_\rho \Delta T + \left(\frac{\partial n}{\partial \rho} \right)_T \Delta \rho. \quad (1.1)$$

Метод термолинзы может быть реализован с помощью как однолучевой, так и двухлучевой схемы измерения. В однолучевой схеме излучение одного лазера одновременно является возбуждающим (индуцирующим тепловую линзу) и пробным излучением. В результате поглощения лазерное излучение нагревает образец, и по изменению его интенсивности судят о величине поглощения в среде. Методика измерения обычно сводится к регистрации временной формы фототермического сигнала с расположенного в дальней зоне диафрагмированного фотоприемника.

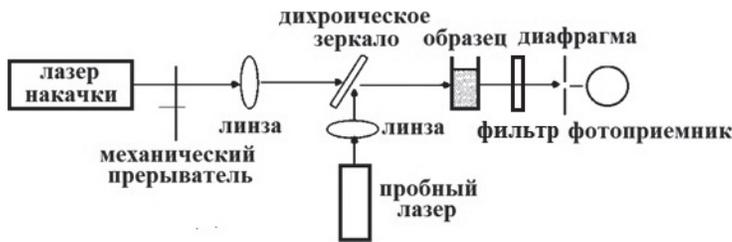


Рис. 1.3. Метод термолинзы (продольный вариант): двухлучевая схема измерений, луч накачки и пробный луч распространяются соосно [23]

Более универсальной является двухлучевая схема, в которой наведенная с помощью возбуждающего излучения (излучение накачки) термолинза регистрируется по расфокусировке дополнительного пробного луча. Ее основное преимущество состоит в том, что она делает возможным исследование спектральной зависимости поглощения материалов, что нельзя сделать в однолучевой схеме. Одна из возможных конфигураций классической двухлучевой схемы измерений представлена на рис. 1.3.

Двухлучевая схема может быть исполнена как в продольном (рис. 1.3), так и в поперечном вариантах [23, 36], когда возбуждающий луч фокусируется в образец перпендикулярно пробному излучению. В большинстве случаев используют продольный (коллинеарный) вариант, когда с помощью, например, дихроического зеркала оба луча распространяются в образце соосно, что обеспечивает максимальную длину взаимодействия. При этом различают так называемые конфигурации *mode-matched* и *mode-mismatched*. В первом случае перетяжки обоих лучей совпадают внутри измерительной ячейки (образца), в то время как во втором они разнесены в пространстве (рис. 1.4).

Схема измерений, в которой используется конфигурация *mode-mismatched*, обеспечивает большую чувствительность метода. При этом коэффициент поглощения образца на длине волны излучения накачки, связанный с термоиндуцированным фазовым сдвигом, определяют из экспериментально наблюдаемой временной зависимости регистрируемой фотоприемником интенсивности центральной части пробного луча, прошедшей через круглую диафрагму, путем ее «подгонки» к теоретической зависимости либо путем

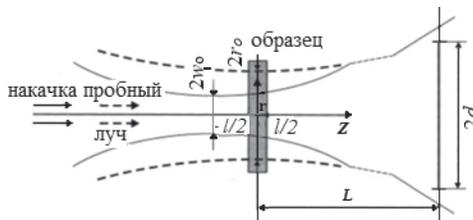


Рис. 1.4. Схема измерений со смещенными перетяжками (*mode-mismatched* конфигурация) [36]

калибровки с использованием стандартного (эталонного) образца с известным поглощением.

Лазер накачки может работать в импульсном и в непрерывном режиме генерации, а интенсивность пробного лазера обычно выбирают постоянной, так что ее изменение на диафрагме возникает лишь в силу наведенной излучением лазера накачки модуляции показателя преломления. Пороговая чувствительность метода на практике ограничивается в основном флуктуациями мощности лазерного излучения. При уровне флуктуаций не выше 0,5–1 % порог по поглощению составляет 10^{-6} – 10^{-7} см^{-1} . Это соответствует порогу обнаружения вариаций показателя преломления примерно на уровне 10^{-8} и вариаций температуры 10^{-6} – 10^{-7} К [24]. В более поздней работе показана возможность измерения коэффициента поглощения величиной $\sim 10^{-8}$ см^{-1} путем применения *Z*-сканирования (сканирования в продольном направлении), являющегося разновидностью метода термолинзы [37].

В последнее время большое распространение получил метод измерения малых поглощений в прозрачных средах с помощью фототермической интерферометрии с общим ходом лучей (*photothermal common-path interferometry, PCI*), использующий термооптический эффект и представляющий собой видоизмененный метод термической линзы [38, 39–43]. Для обеспечения высокого пространственного разрешения в *PCI*-методе пробный луч и луч накачки пересекаются в образце под небольшим углом. Такая конфигурация позволяет устранить также влияние паразитных сигналов от оптики и поверхностей образца. Принципиальное отличие этой техники от классического метода термолинзы дальнего поля состоит в том, что в ней используется схема регистрации сигнала в ближнем поле. При этом интерферируют возмущенная и невозмущенная части одного и того же коллимированного пробного луча. Именно это

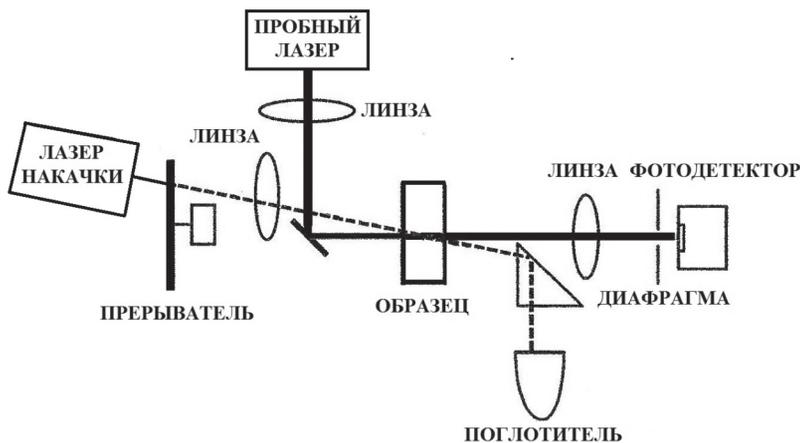


Рис. 1.5. Схема измерений потерь на поглощение в оптических материалах с помощью *PCI*-метода [38]

обстоятельство делает *PCI*-метод близким по чувствительности к интерферометрическим методам измерения поглощения. Можно сказать, что *PCI*-метод представляет собой метод термолинзы, использующий схему детектирования зондирующего сигнала в ближней зоне излучения. Схема *PCI*-метода измерений представлена на рис. 1.5.

К настоящему времени метод термолинзы и его разновидности (*mode-mismatched*, *PCI*, *Z-scan*) широко применяются для измерения слабого поглощения в твердых телах и жидкостях [44–50], анализа следовых количеств вещества [51], кинетики химических процессов [52–54], в нелинейной спектроскопии [55–57] и т.д. Более подробно с методом термолинзы и его модификациями можно ознакомиться в [58–61].

1.4. Поверхностная термическая линза

Метод поверхностной термической линзы представляет собой альтернативу дефлекционной фототермической спектроскопии [62, 63]. Обладая высокой чувствительностью, он имеет по крайней мере два существенных преимущества перед традиционной дефлекционной техникой измерений, которые связаны с соотношением диаметров пробного луча и луча накачки (рис. 1.6).

Если размер области, облучаемой лучом пробного лазера, превышает размер области, нагреваемой излучением накачки, то в этом случае отсутствуют жесткие требования, предъявляемые к настройке (юстировке) схемы измерений. Более того, при регистрации дифракционной картины с помощью ПЗС-камеры можно получить существенно более полную информацию о характере

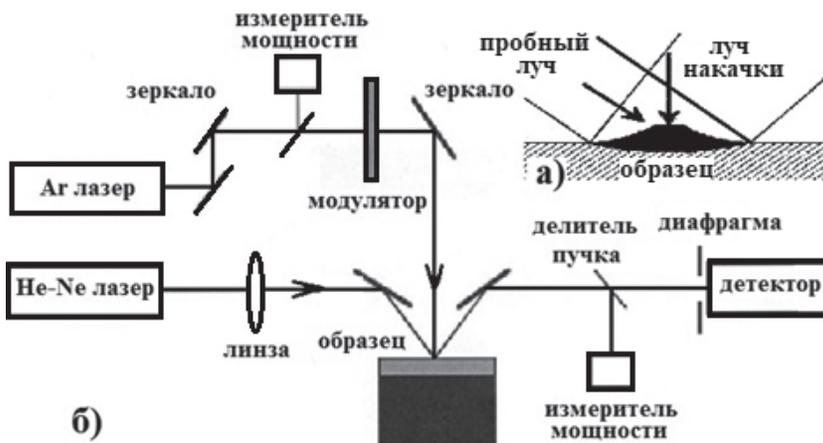


Рис. 1.6. а) Схематическое представление процесса измерений с помощью метода поверхностной термической линзы; б) схема экспериментальной установки [63]

поверхностной деформации. Это является важным преимуществом по отношению к традиционной дефлекционной технике, в которой пробный луч фокусируется в малую область участка поверхности, подвергнутого деформации. Следствием этого являются существенно меньшие затраты времени при картографировании исследуемой поверхности, например при измерении поглощения в тонкопленочных покрытиях, где техника поверхностной термической линзы нашла широкое применение [63, 64].

1.5. Метод фототермической радиометрии

Пассивное измерение потока теплового излучения, испускаемого телом, длительное время служило для определения его температуры. Этот метод имеет определенное преимущество перед другими, использующими, например, термомпару, т. к. не требует прямого физического контакта с объектом. Однако он обладает и недостатками, связанными в основном с влиянием отраженных потоков излучения от других тел и необходимостью знания излучательной способности тела.

Метод лазерной фототермической радиометрии (ЛФТР) имеет активный характер и устраняет влияние фонового излучения от посторонних объектов, в окружении которых может находиться исследуемое тело. Суть метода достаточно проста (рис. 1.7).

В процессе измерений исследуемый образец подвергается воздействию модулированного по гармоническому закону непрерывного лазерного излучения либо периодически следующих лазерных импульсов. Вследствие частичного поглощения лазерного излучения и выделения при этом тепла имеет место модуляция температуры поверхности образца и регистрируемого теплового потока на частоте повторения лазерных импульсов (частоте модуляции). Измеряя

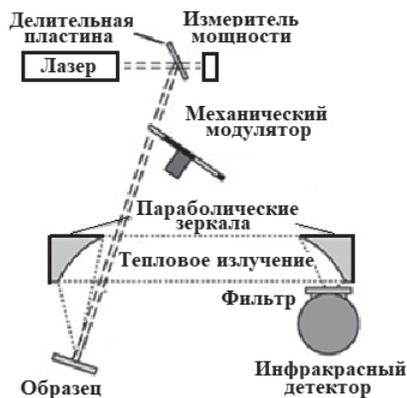


Рис. 1.7. Схема экспериментальной установки для измерений методом ЛФТР [65, 66]

временную зависимость амплитуды динамической составляющей регистрируемого теплового сигнала и его фазы, можно получить информацию о различных физических свойствах объекта.

Что касается практической реализации метода ЛФТР, то он применяется для исследования электронных свойств полупроводниковых материалов и контроля их дефектной структуры [67, 68], для измерения малых поглощений в объеме оптических материалов, а также в тонких пленках и поверхностных слоях вещества [1, 69—73]. Метод применяется для дистанционного измерения температуры тел и их теплофизических параметров (теплопроводность, температуропроводность) [74—82], для дистанционного спектрального анализа в различных технологических задачах при исследовании поверхности материалов и покрытий [83—86], в термоволновой микроскопии и термографии [87, 88].

1.6. Метод фототермического отражения

Метод фототермического отражения (фотомодуляционная спектроскопия отражения), являясь одной из наиболее распространенных методик модуляционной спектроскопии [89—101], нашел широкое применение при исследовании энергетической структуры полупроводниковых материалов, включая квантово-размерные структуры [90—99]. Эта техника очень чувствительна к оптическим переходам и позволяет определять их энергетическое положение с точностью до нескольких миллиэлектронвольт. В этом методе регистрируется изменение спектра отражения $\Delta\rho(\lambda) = \Delta R(\lambda)/R$ или спектра пропускания $\Delta\tau(\lambda) = \Delta T(\lambda)/T$ тестирующего (пробного) излучения, обусловленное фотомодуляцией — изменением оптических параметров структуры под действием дополнительного

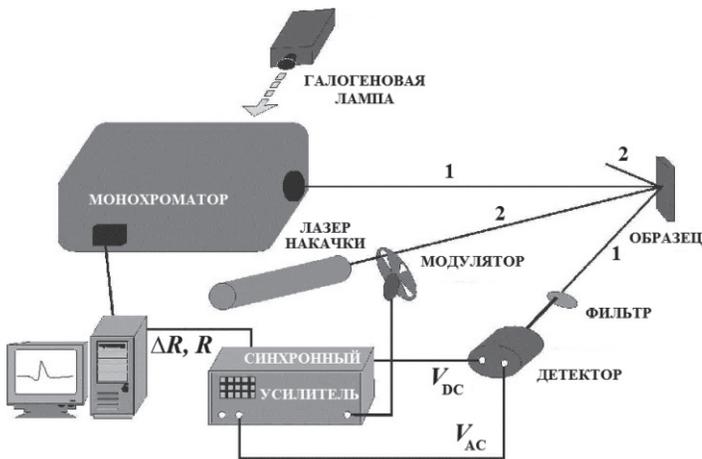


Рис. 1.8. Одна из возможных схем измерений с помощью метода фототермического отражения [99]

облучения светом с длиной волны, находящейся в области собственного поглощения полупроводника (излучение накачки). При этом относительное изменение коэффициента отражения определяется следующим образом:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R_{\text{выкл}} - R_{\text{вкл}}}{R_{\text{выкл}}}, \quad (1.2)$$

где $R_{\text{выкл}}$ и $R_{\text{вкл}}$ — коэффициенты отражения пробного излучения при отсутствии и при наличии излучения накачки соответственно. Применение фазочувствительного детектирования позволяет регистрировать относительное изменение коэффициента отражения, составляющее 10^{-6} – 10^{-7} [99]. Одна из возможных схем метода фототермического отражения представлена на рис. 1.8.

1.7. Интерференционный метод

Как уже отмечалось, вариации показателя преломления в облучаемой среде приводят к изменению фазы проходящей через эту среду волны излучения. Наиболее чувствительным методом регистрации изменения фазы, как известно, является интерференционный (фазовый) метод. В этом методе исследуемая среда помещается в одно из плеч интерферометра (рис. 1.9).

Изменение показателя преломления на величину Δn приводит к изменению фазы волны в этом плече на величину

$$\Delta\varphi = (2\pi L/\lambda_n)\Delta n, \quad (1.3)$$

где L — длина области пространственного совмещения в образце возбуждающего излучения (накачка) и пробной волны, λ_n — длина волны пробного излучения.

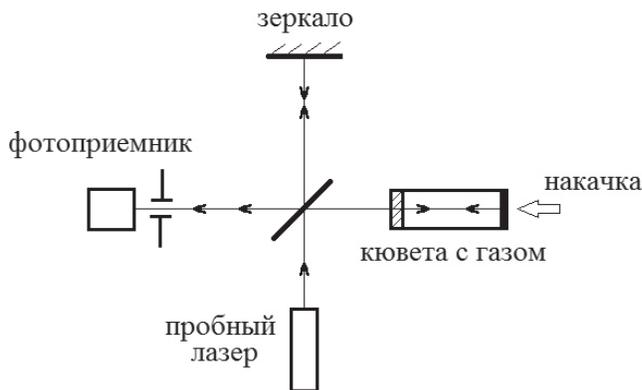


Рис. 1.9. Интерферометр Майкельсона с исследуемой в кювете средой (прозрачная для накачки задняя стенка кюветы является зеркальной для излучения пробного лазера) [22]